

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektromagnetického pole

**Milan Švanda**

## **NÍZKOPROFILOVÉ ANTÉNY V BLÍZKOSTI LIDSKÉHO TĚLA**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Radioelektronika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, duben 2011

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na katedře elektromagnetického pole Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: jméno	Ing. Milan Švanda
pracoviště	Katedra elektromagnetického pole FEL ČVUT
adresa	Technická 2, 166 27, Praha 6

Školitel: jméno	Ing. Milan Polívka, Ph.D.
katedra	Katedra elektromagnetického pole FEL ČVUT
adresa	Technická 2, 166 27, Praha 6

Školitel specialista:	prof. Ing. Miloš Mazánek, CSc.
katedra	Katedra elektromagnetického pole FEL ČVUT
adresa	Technická 2, 166 27, Praha 6

Oponenti: .....

.....

.....

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru radioelektronika v zasedací místnosti č. .... Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

.....

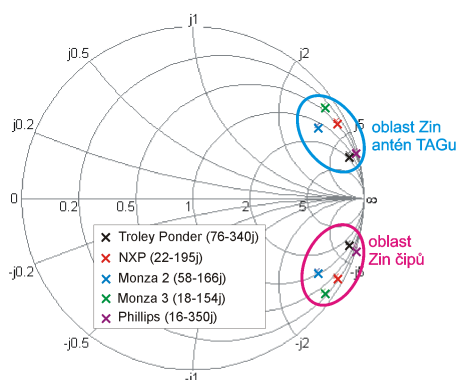
předseda komise pro obhajobu disertační práce  
ve studijním oboru radioelektronika  
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

# Obsah

<b>1</b>	<b>Současný stav problematiky</b>	<b>1</b>
1.1	Vybraná řešení zářičů pracujících nad kovy a dielektriky . . . . .	2
1.2	Antény s komplexní vstupní impedancí . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Cíle disertační práce</b>	<b>5</b>
2.1	Motivace . . . . .	5
2.2	Cíle práce . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Metody zpracování</b>	<b>7</b>
3.1	Techniky dosažení extrémní nízkoprofilovosti antén pracujících nad lidským tělem . . . . .	7
3.2	Techniky ladění komplexní vstupní impedance . . . . .	13
3.3	Maximalizace čtecího dosahu UHF RFID systému . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Výsledky</b>	<b>16</b>
4.1	Dosažené parametry vzorků zářičů . . . . .	16
4.2	Maximalizace čtecího dosahu UHF RFID systému . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>19</b>
5.1	Shrnutí a původní přínos . . . . .	20
	<b>Literatura</b>	<b>21</b>

# 1 Současný stav problematiky

V současnosti jsou stále větší nároky kladeny na miniaturizaci rozměrů zářičů přičemž je vždy třeba zvažovat několik protichůdných požadavků. Specifické požadavky mají aplikace u kterých se předpokládá umístění antén na lidském těle. Příkladem takové aplikace je bezkontaktní identifikace osob, kdy je anténa umístěna na hrudi osoby např. ve formě jmenovky nebo jako součást oděvu. Zásadním požadavkem na takovou anténu je minimální vliv lidského těla na její parametry. Dále pak malé rozměry a především výška profilu antény. Specifickou vlastností těchto antén je komplexní hodnota jejich vstupní impedance. Tato vlastnost je způsobena nutností napájet anténu poliovodičovým čipem jehož vstupní impedance má z technologických důvodů kapacitní charakter viz. obr. 1.1. V posledních letech bylo publikováno několik antén pro umístění na kovové materiály. Tyto antény však nedosahují mechanických nebo elektrických vlastností uspokojivých pro zmíněnou aplikaci.



**Obrázek 1.1:** Vstupní impedance RFID čipů ( $Z_{in}$ ).

V úvodní části práce jsou rozebrány vlastnosti zářičů nad dielektrickými a kovovými objekty včetně dosud publikovaných typů nízkoprofilových řešení. V dalších kapitolách jsou navrženy a popsány nové techniky umožňující vytvoření antén s extrémně nízkým profilem, které bude možno bez významné degradace parametrů provozovat v blízkosti lidského těla nebo jiných dielektrických a vodivých objektů. Součástí těchto technik je také možnost zajistit nastavení vstupní impedance v komplexních hodnotách. Dále jsou popsány modelované a měřené parametry vyrobených vzorků zářičů navržených na základě zmíněných technik. Součástí práce je také optimalizace RFID systému s využitím navržených vzorků zářičů pro identifikace osob a praktické testování takto optimalizovaného systému.

## 1.1 Vybraná řešení zářičů pracujících nad kovy a dielektriky

Z rozborů uvedených v práci je zřejmé, že dosažení extrémně nízkého profilu antény je svázáno s významným poklesem vyzařovací účinnosti. V literatuře lze nalézt několik přístupů, které se snaží tuto problematiku řešit. Lze však říci, že tato problematika je stále aktuální a obecné plně uspokojivé řešení nebylo dosud nalezeno. Jednotlivé přístupy, jejich přednosti a nevýhody jsou shrnuty v této části.

### Antény s distanční podložkou

Jednoduchý způsob, jak vyřešit problém s umístěním antény do blízkosti lidského těla popř. kovových předmětů je využití dielektrické podložky, na kterou je nejčastěji umístěna běžná anténa typu zkrácený planární dipól. Parametry podložky jsou brány v úvahu již při návrhu zářiče a pokud je tloušťka podložky dostatečná, vliv dalších objektů touto podložkou oddělených je minimalizován. Největší nevýhodou uváděného řešení je poměrně značná tloušťka podložky ( $0,01 - 0,1 \lambda_0$ ). Příkladem antén využívajících dielektrické podložky může být Marrocco [1], který využívá  $4\text{mm}$  ( $0,01 \lambda_0$ ) silné podložky pro odstínění dipólové antény v UHF RFID pásmu. Účinnost antény autor neuvádí, ale její zisk je menší než  $-6\text{dBi}$ . Další příklady lze nalézt v [2, 3, 4].

### Patchové antény a planární invertované F antény

Jiným přístupem je využití antén jejichž nedílnou součástí je zemní rovina, která může do značné míry odstínit vliv materiálu podložky na elektrické vlastnosti antény. Příkladem takového zářiče je např. patchová anténa. Jak je v práci podrobně rozebráno, narážíme zde na problém, kterým je výrazný pokles vyzařovací účinnosti antény v závislosti na zmenšování poměru jejího profilu k vlnové délce  $h/\lambda_0$ . Tento problém je výrazný především na nízkých kmitočtových pásmech (UHF), kde jsou díky velké vlnové délce absolutní rozměry antény pro řadu aplikací neakceptovatelné. Určitou modifikací je planární invertovaná F anténa (PIFA - planar inverted F antenna), která trpí stejnými nevýhodami jako patchová anténa. Příklady viz. [5, 6, 7].

### Umělé magnetické povrchy

Daniel Frederic Sievenpiper navrhl a publikoval [8, 9] tzv. vysokoimpedanční povrch (High Impedance Surface - HIS), někdy také nazýván jako umělý magnetický vodič (Artificial Magnetic Conductor - AMC). V řadě publikací [9, 10, 11] lze pak nalézt jeho různé modifikace, návrhové postupy či aplikace. Takovýto povrch vykazuje ve svém pracovním kmitočtovém pásmu vysokou hodnotu tzv. povrchové impedance (poměr intenzity elektrického pole ku intenzitě magnetického pole na povrchu) a potlačuje tedy značně šíření povrchových vln. Zajímavé jsou také jeho odrazné vlastnosti. Povrch odráží většinu dopadajícího

výkonu stejně jako elektrický vodič, fáze odražené vlny je však ve fázi s vlnou přímo emitovanou zářičem. Jinými slovy lze říci, že obraz povrchových proudů má souhlasný směr jako proudy tekoucí na zářiči. Při použití tohoto povrchu nedochází tedy k destruktivnímu odrazu ani při umístění antény do těsné blízkosti povrchu ( $h \ll \lambda_0/4$ ).

Veškeré varianty výše popsaných struktur sice umožní umístit zářič extrémně blízko umělého povrchu, tloušťka vlastního povrchu je však poměrně značná. Podle typu struktury se pohybuje v rozmezí  $(1, 5 - 0,025 \lambda_0)$ , [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. Zářič pak může být umístěn v minimální výšce, typicky  $0,1 - 0,01 \lambda_0$  nad tímto povrchem. Naprostá většina publikovaných článků se zaměřuje na návrh a využití umělých povrchů pracujících v mikrovlnných kmitočtových pásmech ( $5GHz$ ,  $10GHz$ ) a absolutní výška povrchu je zde přijatelná. Pokud je však cílem použít tento přístup pro antény pracující v nižších kmitočtových pásmech (např. UHF), pohybuje se výška profilu takové antény v řádu desítek mm. O nízkoprofilové anténě zde tedy nelze hovořit.

### Víceramenné dipóly

Best se zabýval vlivem vodivé roviny na parametry půlvlnného dipólu; [19, 20]. Z rozboru vyplývá, že zmenšováním vzdálenosti dipólu  $h$  od vodivé roviny (pro  $h < \lambda/4$ ) dochází k výraznému poklesu vyzařovacího odporu a následně vyzařovací účinnosti. Ve zmíněných článcích publikoval návrh víceramenného skládaného dipólu, který je schopen tento jev eliminovat a pracovat tak poměrně blízko nekonečně rozlehlé vodivé roviny ( $0,023 \lambda_0$ ). Řešení vychází z dobře známého principu skládaného dipólu, [21]. Touto technikou bylo dosaženo zvýšení vyzařovacího odporu a tím dobrého přizpůsobení a vyšší vyzařovací účinnosti bez nutnosti použít externí přizpůsobovací obvod.

## 1.2 Antény s komplexní vstupní impedancí

Stěžejním parametrem při návrhu antén všech typů je jednoznačně vstupní impedance, jejíž správně nastavená hodnota umožní přenos výkonu bez zbytečných ztrát odrazem. V drtivé většině případů je požadovanou vstupní impedancí reálná hodnota a to  $50$  nebo  $75\Omega$ , která odpovídá charakteristické impedanci napájecího kabelu nebo konektoru. V současnosti jsou však velice rozšířené systémy bezkontaktní identifikace pracující v pásmu UHF. Antény RFID TAGů nejsou napájeny prostřednictvím konektoru, ale jsou přímo na svém vstupu opatřeny polovodičovým čipem. Z technologických důvodů mají tyto čipy kapacitní vstupní impedanci. Vstupní impedance antény se tedy této hodnotě musí přizpůsobit. Přesněji řečeno musí být komplexně sdruženou hodnotou. Navíc používané antény RFID TAGů nemají základní rezonanční délku, ale jsou zmenšené pomocí některé ze známých technik. Např. meandrové zkrácení nebo kapacitní zatížení jednotlivých ramen dipólu. Takto miniaturizované antény vykazují také kapacitní charakter vstupní impedance a tento jev je třeba vzít v úvahu při jejich návrhu.

Základem drtivé většiny RFID TAGů pracujících v pásmu UHF je anténa typu zkrácený dipól. Používají se dva základní způsoby, jak u těchto antén dosáhnout komplexní

(induktivní) hodnoty vstupní impedance, [22].

### **Přizpůsobení pomocí zkratovaného pahýlu**

Jedním z možných způsobů je využití tzv. zkratovaného pahýlu. Pahýl vysoké impedance se chová jako indučnost a při vhodném nastavení jeho délky lze vykompenzovat kapacitní složku vstupní impedance.

### **Přizpůsobení pomocí induktivní smyčky**

Druhým způsobem je přizpůsobení pomocí induktivní smyčky, která využívá ke zvýšení indukčnosti vlastní indukčnost smyčky a magnetickou vazbu mezi smyčkou a vlastním zářičem. Pokud není mezera mezi smyčkou a zářičem příliš malá, je magnetické pole smyčky navázáno na zářič.

## 2 Cíle disertační práce

### 2.1 Motivace

Již několik desítek let je velice rozšířená řada aplikací systémů pro bezkontaktní identifikaci objektů (RFID). V posledních letech se však stále častěji objevuje poptávka využívat tyto systémy pro identifikaci objektů vykazujících nepříliš vhodné materiálové složení pro umístění antén TAGů na jejich povrch. Příkladem může být identifikace osob, kovových objektů nebo např. kapalin. Takovéto aplikace vyžadují bezpodmínečně antény TAGu, jejíž vlastnosti jsou odolné vůči vlivu materiálu, na který je anténa umístěna. Jedná se především o vyzařovací účinnost a vstupní impedanci antény. Zřejmým cílem výzkumníků v této oblasti je také dosažení pokud možno minimálních půdorysných rozměrů a především pak minimální výšky profilu. V oblasti studia a vývoje zářičů zmíněných vlastností bylo publikováno několik přístupů, jejichž využití však stále není uspokojivě použitelné v praxi; viz. předchozí kapitola.

Celou situaci komplikuje především nutnost realizovat tyto antény na poměrně nízkém kmitočtu (v pásmu 860 - 930 MHz), kde je vlnová délka přibližně v rozmezí 350 - 320 mm, což je stále absolutně poměrně velký rozměr pro antény umístěné na lidském těle. Některé RFID systémy pracují také v pásmu 2,45 GHz, kde by realizace mechanicky malých antén nebyl velký problém, a kde by bylo možno využít některou ze zmíněných publikovaných miniaturizačních technik. V tomto kmitočtovém pásmu se však v současnosti nabízí téměř výhradně aktivní RFID systémy, tedy systémy jejichž TAG obsahuje baterii. Jedním z důvodů je značný nárůst ztrát volným prostorem, který významně snižuje identifikační dosah takového systému.

Antény těchto vlastností lze samozřejmě aplikovat i v jiných oblastech vysokofrekvenční techniky, oblast RFID systémů je však pro jejich případné využití stěžejní.

### 2.2 Cíle práce

Cílem disertační práce je studium a návrh nových technik umožňující výrazné snížení profilu antén nad zemní rovinou (typicky pod setinu vlnové délky), které je možno bez významné degradace vyzařovacích parametrů provozovat v bezprostřední blízkosti lidského těla nebo jiných dielektrických a vodivých objektů. S ohledem na využití v RFID systémech musí být součástí těchto technik také možnost zajistit nastavení vstupní impedance v komplexních hodnotách. Konkrétní cíle práce mající charakter původního přínosu v daném vědním oboru lze tedy shrnout do následujících bodů.



- 
- Nalezení a studium nových technik snižujících výrazně (pod  $0,01 \lambda_0$ ) profil antén určených pro efektivní činnost v bezprostřední blízkosti lidského těla.
  - Nalezení a studium nových technik umožňujících naladění komplexní vstupní impedance studovaných zářičů v požadovaném rozsahu.
  - Optimalizace parametrů UHF RFID systému pro maximalizaci čtecího dosahu s využitím studovaných zářičů a navržených technik.

## 3 Metody zpracování

### 3.1 Techniky dosažení extrémní nízkoprofilovosti antén pracujících nad lidským tělem

Z rozboru vyzařovací účinnosti a dalších anténních parametrů uvedeném v úvodu práce je zřejmé, že vytvořit nízkoprofilový zářič, jehož parametry budou minimálně ovlivněny materiálem, na který je anténa umístěna (např. lidským tělem), je velice obtížná úloha. Dosud publikovaná řešení jako je využití distanční podložky nebo využití běžných patchových a PIFA antén, umožňují při zachování dostatečné vyzařovací účinnosti dosáhnout pouze omezeného snížení profilu antény ( $h > 0,05 \lambda$ ). Umístění zářiče nad vysokoimpedanční povrchy umožní dále snížit profil výsledné antény na  $h > 0,03 \lambda$ . Především pro využití na nižších kmitočtových pásmech (UHF) je však toto řešení z hlediska absolutních rozměrů stále neuspokojivé.

Tato kapitola teoreticky popisuje a na základě modelování pomocí simulátorů elektromagnetického pole porovnává nově vyvinuté resp. upravené techniky vhodné pro dosažení extrémní nízkoprofilovosti antény pro činnost nad lidským tělem nebo jinými dielektrickými a vodivými objekty. Výsledné vzorky byly navrhovány pro použití v evropském RFID pásmu na kmitočtu  $869 MHz$  resp.  $866 MHz$ . Proto byly tyto kmitočty zvoleny jako vztažné i pro modelování vlastností zde rozebíraných technik.

#### Technika víceramenných dipólů

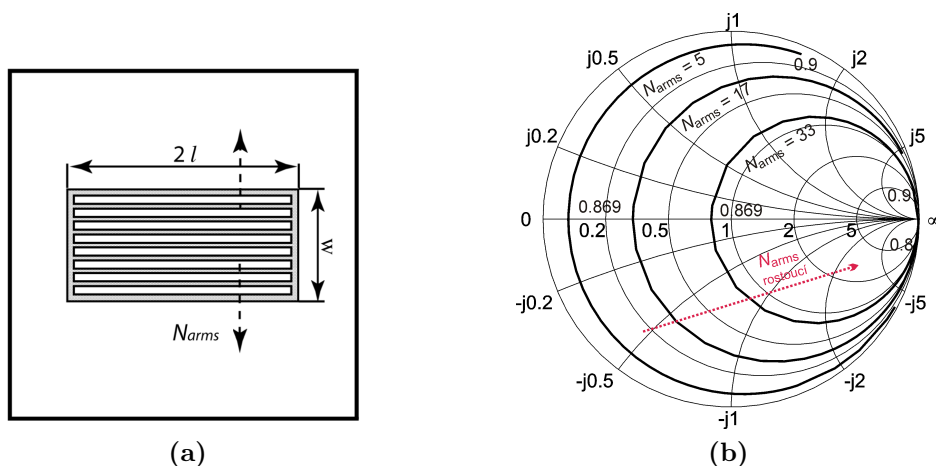
Určitou cestu by mohlo představovat využití dobře známého principu skládaného dipólu; [23]. Aby bylo možné dosáhnout skutečně nízkoprofilové antény, je třeba toto řešení upravit; [24, 25]. Podstata modifikace vychází z myšlenky umístit napájenou větev do jedné roviny s nenapájenými větvemi a motiv zářiče vytvářet planární technologií na společném substrátu se stínicí rovinou; viz. obr. 3.1a. Vstupní impedanci vlastního víceramenného dipólu je třeba ladit na požadovanou hodnotu (např.  $50 \Omega$ ) za přítomnosti stínicí vodivé roviny umístěné v dané vzdálenosti od motivu zářiče. Tato rovina se tak stává principiální součástí anténní struktury.

Vztah mezi vstupní impedancí  $Z_{in}$  a počtem ramen  $N_{arm}$  lze vyjádřit následujícím výrazem.

$$Z_{in} \approx N_{arm}^2 Z_{11} \quad (3.1)$$

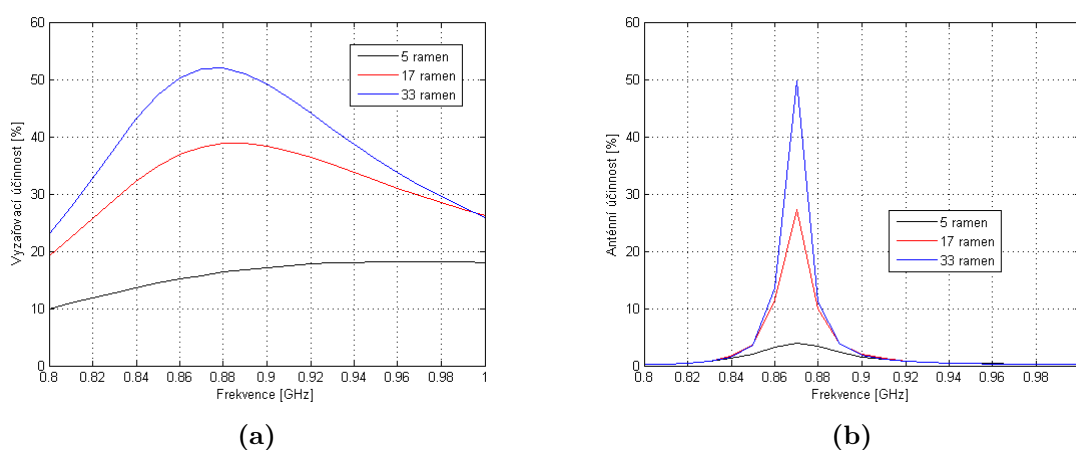
kde  $Z_{11}$  je vstupní impedance samostatného napájeného ramene ve volném prostoru. Uvedený vztah je platný pro dipól umístěný v těsné blízkosti vodivé roviny. Amplitudy všech

proudů tekoucích jednotlivými rameny jsou uvažovány stejně velké; [23]. Pokles vstupní impedance dipólu vlivem přítomnosti vodivé roviny je tedy kompenzován narůstajícím počtem ramen víceraamenné konfigurace.



**Obrázek 3.1:** Geometrie víceraamenného skládaného dipólu (a) a kmitočtový průběh jeho vstupní impedance ( $0,8 \div 1GHz$ ) (b) jako funkce počtu ramen ( $N_{arm} = 1, 5, 17, 33$ ).

Následující obrázek ilustruje vliv počtu ramen na vyzařovací a anténní účinnost víceraamenného dipólu. Ve shodě s předpoklady je možné pozorovat významný nárůst vyzařovací účinnosti. Nárůst anténní účinnosti je ještě výraznější, neboť tato veličina zahrnuje kromě vyzařovací účinnosti také přizpůsobení antény.



**Obrázek 3.2:** Geometrie víceraamenného skládaného dipólu (a) a kmitočtový průběh jeho vstupní impedance ( $0,8 \div 1GHz$ ) (b) jako funkce počtu ramen ( $N_{arm} = 1, 5, 17, 33$ ).

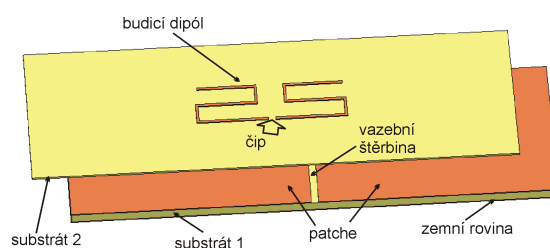
### Technika vázaných patchů

Jiným přístupem umožňujícím dosáhnout extrémně nízký profil antény je nově vyvinutá technika nazvaná Technika vázaných patchů. Výchozí strukturou je zde patchový typ antény. U běžné patchové antény však dochází se snižováním tloušťky substrátu k výraznému poklesu vyzařovací účinnosti. Pokud na společném substrátu vytvoříme dvojici patchů oddělených ve středu štěrbinou, získáme zářič výrazně lepších vlastností. Základní verzí takové antény je půvlunné provedení, které je tvořeno dvojicí obdélníkových půvlunných patchů vázaných štěrbinou jejíž šířka nemá zásadní vliv na účinnost antény.

Strukturu je možné budit symetricky pomocí budicího zářiče, který je umístěn nad vlastní patchovou strukturou nebo ji lze budit přímo mezi dvojicí patchů. V této části jsou rozebrány vlastnosti těchto dvou možností. Vlastnosti byly ověřeny pomocí modelování v simulátoru elektromagnetického pole IE3D.

### Dipólem buzená vázaná patchová anténa

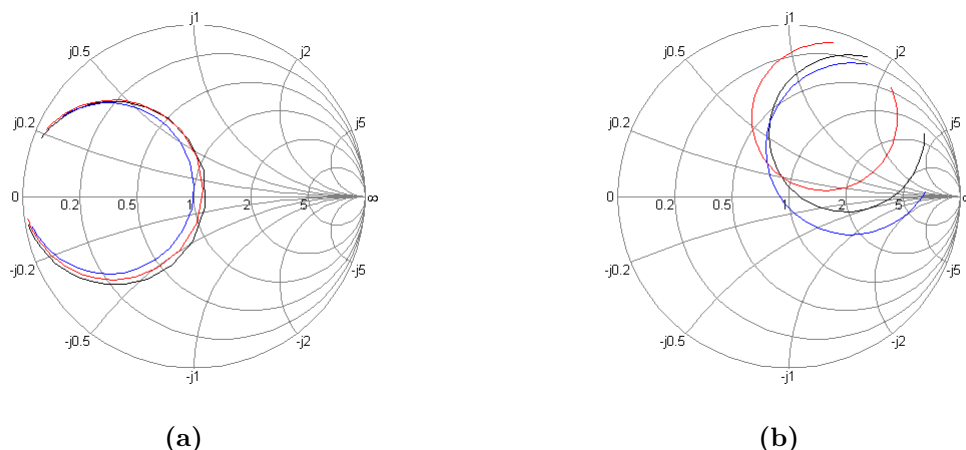
Jako budicí zářič byl zvolen skládaný planární dipól, který je umístěn v další vrstvě substrátu nad patchovou strukturou; viz. obr. 3.3. Je možné zvolit i jiné geometrie, jako např. planární smyčkovou anténu apod. Vzdálenost budicího dipólu od patchů nemá zásadní vliv na parametry antény a může být velice malá. V našem případě byl použit substrát s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 3,2$ , tloušťky  $0,25\text{mm}$  ( $h/\lambda_0 \sim 0,0007$ ). Rozměry budicího dipólu byly naladěny dle požadované vstupní impedance antény, v tomto případě na  $50\ \Omega$ .



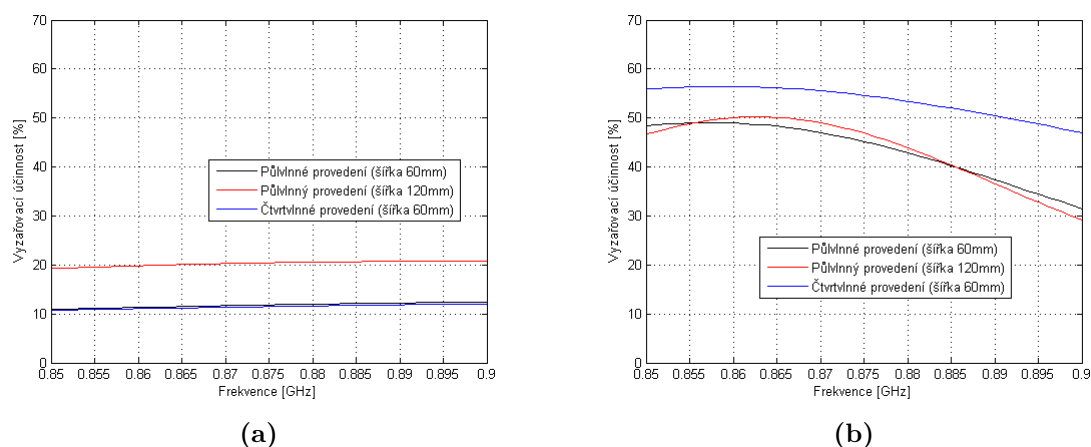
**Obrázek 3.3:** Geometrie dipólem buzené půvlunné vázané patchové antény.

Jak bylo zmíněno výše, struktura vychází z patchové antény jejíž vlastnosti však výrazně vylepšuje. Následující série grafů porovnává impedanční vlastnosti a účinnost obou typů antén. Porovnávány byly vlastnosti tří modifikací vázané patchové antény. Základem je půvlunná patchová anténa která je zobrazená na obr. 3.3 a jejíž rozměry byly vypočteny na základě modelu planárního vedení pro běžnou obdélníkovou patchovou anténu; [26]. Pro použitý substrát tloušťky  $0,76\text{mm}$  vychází následovně: délka jednotlivého patche  $l = 96\text{mm}$ , jeho šířka  $w = 120\text{mm}$ . Půdorysné rozměry tohoto provedení lze zmenšit zúžením antény na šířku  $w = 60\text{mm}$ . Dalším krokem je pak vytvoření čtvrtlunné verze pomocí zkratování vnějších okrajů obou patchů. Vznikne tak dvojice čtvrtlunných patchů vázaných pomocí štěrbin. Celkové půdorysné rozměry této verze jsou  $l = 96\text{mm}$  a  $w = 60\text{mm}$ . Vazební štěrbinu má šířku  $s = 0,5\text{mm}$ .

Pro demonstraci výrazného zvětšení účinnosti pomocí techniky vázaných patchů byly výše uvedené antény porovnány se 3 variantami běžné obdélníkové patchové antény odpovídajících půdorysných rozměrů.



**Obrázek 3.4:** Průběh vstupní impedance patchové (a) a vázané patchové antény (b).

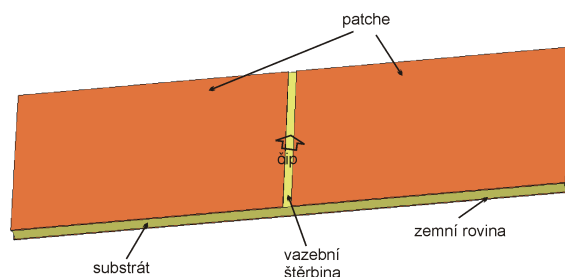


**Obrázek 3.5:** Vyzařovací účinnost patchové (a) a vázané patchové antény (b).

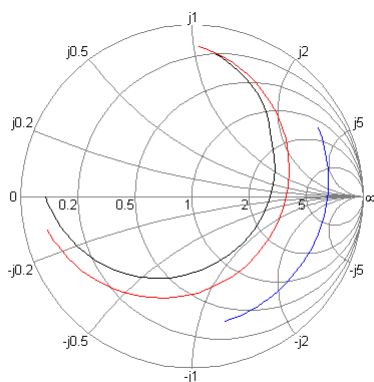
### Přímo buzená vázaná patchová anténa

Druhou možností jak vybudit popisovanou strukturu je přímé buzení. Napájení je zde připojeno symetricky mezi dvojicí patchů; viz. obr. 3.6. Je tak dosaženo výrazného zjednodušení celé struktury, která je nyní tvořena pouze jedním oboustranně pokoveným substrátem. Následující grafy zobrazují průběhy vstupní impedance a vyzařovací účinnosti. Stejně jako u dipólem buzené varianty vykazuje graf vyzařovací účinnosti ve srovnání se standardní patchovou anténou (viz. obr. 3.5a) výrazně vyšší hodnoty. Opět byly porovnávány 3

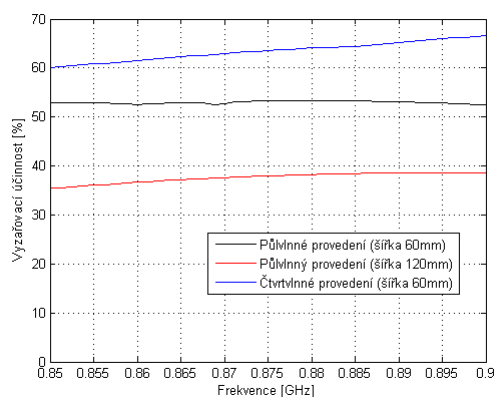
varianty. Půlvlnná struktura jejíž šířka vychází z patchové antény navržené na základě modelu planárního vedení  $l = 195\text{mm}$ ,  $w = 120\text{mm}$ , zúžená půlvlnná struktura  $l = 195\text{mm}$ ,  $w = 60\text{mm}$  a zúžená čtvrtvlnná struktura  $l = 99\text{mm}$ ,  $w = 60\text{mm}$ . Jak je podrobně popsáno v práci, dosažení vstupní impedance  $50\Omega$  není možné pro libovolnou šířku antény. Proto byla anténa pro účely této kapitoly navrhována na obecnou reálnou impedanci.



**Obrázek 3.6:** Geometrie přímo buzené vázané patchové antény.



(a)



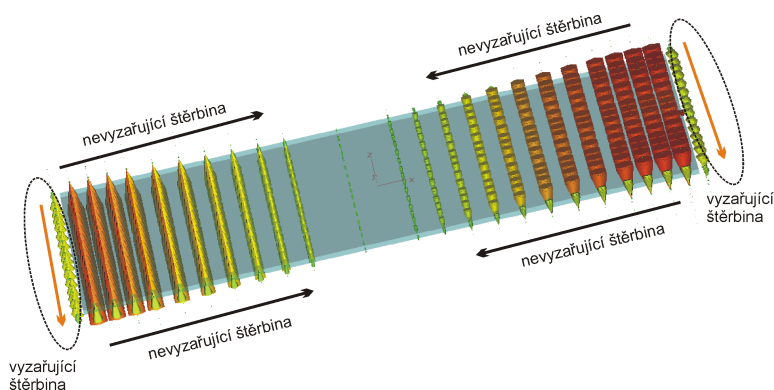
(b)

**Obrázek 3.7:** Průběh vstupní impedance (a) a vyzařovací účinnost (b) přímo buzené vázané patchové antény.

### Princip vyzařování vázaných patchových antén

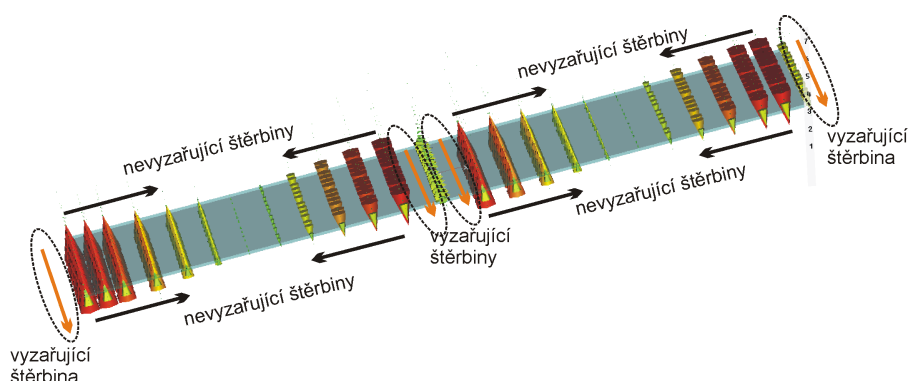
Pomocí uvedené techniky lze tedy navrhnout anténu vyznačující se velice zajímavými elektrickými i mechanickými vlastnostmi především s ohledem na odolnost vůči vlivu objektu, na který má být umístěna. Z rozboru je patrné, že tato technika vykazuje výrazně lepší vyzařovací účinnost než běžný typ patchové antény. Princip vyzařování obou rozebíraných variant (přímo a dipólem buzené) je shodný, liší se zde pouze typ buzení patchové struktury. K popisu vyzařování použijeme tedy přímo buzenou variantu v půlvlnném resp. čtvrtvlnném provedení. Princip vyzařování lze ilustrovat pomocí modelu vedení (TLM, z angl. Transmission Line Model) analogicky k principu vyzařování obdélníkové patchové

antény, [27]. Model vychází z představy zářiče jako širokého úseku mikropáskového vedení délky přibližně  $L \sim \lambda_g/2$  na daném substrátu. V základní půlvlnné rezonanci se rozložení intenzity elektrického pole nemění podél šířky  $W$  a tloušťky substrátu  $h$ , mění se pouze podle délky  $L$ . Vyzařování je pak připisováno především rozptylovým polím na protilehlých okrajích patche podél rezonančního rozměru  $L$ . Pole lze rozložit na normálové a tečné složky vzhledem k zemní rovině. Protože má patch délku  $L \sim \lambda_g/2$ , jsou normálové složky posunuty o  $180^\circ$  a jimi vytvořené pole se vyruší. Tečné složky jsou naopak ve fázi a jimi vytvořené pole je maximální.



**Obrázek 3.8:** Znázornění proudového obložení a vyzařujících a nevyzařujících šterbin patchové antény.

Na základě zobrazení intenzity elektrického pole vázané patchové antény; viz. obr. 3.9, je možné analogicky k obdélníkovému patchi reprezentovat vázanou patchovou anténu pomocí pěti pravoúhlých šterbin buzených ve fázi. Čtveřice šterbin reprezentuje rozptylové pole na vnějších a vnitřních okrajích jednotlivých patchů, prostřední šterbina reprezentuje elektromagnetické pole vazební šterbiny; viz. obr. 3.9. Příspěvky těchto šterbin se ve vzdálené zóně sčítají ve fázi a lze tedy předpokládat vyšší vyzařovací účinnost než u obdélníkového patche. Na celkovém vyzařování se tedy podílí šterbiny na okraji zářiče a z části také vazební šterbina uprostřed struktury.



**Obrázek 3.9:** Znázornění proudového obložení a vyzařujících a nevyzařujících šterbin vázané patchové antény.

Čtvrtvlnné provedení vázané patchové antény [28] se podobně jako čtvrtvlnné provedení běžného pravoúhlého patche liší vloženou zkratovací stěnou, která umožní zmenšit rezonanční délku na přibližně polovinu při zachování původního rezonančního kmitočtu a původního módu, ze kterého je na struktuře ovšem jen čtvrtina vlny.

## 3.2 Techniky ladění komplexní vstupní impedance

Většina dosud běžně používaných antén bývá navrhována na reálnou vstupní impedanci většinou  $50\ \Omega$  nebo  $75\ \Omega$ . Tato impedance umožní, v ideálním případě, bezodrazový přenos energie mezi napájecími kabely a anténou. V posledních letech se však velice rozšířila aplikace antén pro RFID systémy. Antény pro RFID TAGy však nejsou napájené prostřednictvím standardizovaných konektorů, ale přímo pomocí polovodičových čipů. Jejich vstup musí tak být přizpůsobený vůči kapacitní impedanci čipu. Vstupní impedance vlastní antény je pak komplexně sdruženou hodnotou ke vstupní impedanci napájecího čipu. Hodnoty impedancí používaných RFID čipů jsou uvedeny na obrázku 1.1. Tato, v poslední době velice významná aplikace planárních typů antén, nás nutí zabývat se podrobněji možnostmi ladění vstupní impedance antén a to v rámci obecně komplexních hodnot. Tato práce se zaměřuje na nízkoprofilové typy antén, které jsou schopny pracovat v blízkosti lidského těla, a proto se zde omezíme na techniky ladění komplexní impedance právě u typů antén popsanych v předchozí kapitole. Podrobná parametrická studie popisující vliv jednotlivých parametrů struktury na velikost vstupní impedance a vyzařovací účinnosti je uvedena v následující kapitole.

### Technika víceramenných dipólů

Ladění vstupní impedance u víceramenného dipólu je poměrně jednoduché a je pevně svázáno se zvyšováním účinnosti antény nad vodivým povrchem. Zvětšením počtu ramen lze dosáhnout zvýšení reálné části vstupní impedance (zmenšení poloměru impedanční smyčky ve Smithově diagramu); viz. (3.1). Tato technika je podrobně popsána v předchozí kapitole. Obecné komplexní hodnoty vstupní impedance lze pak dosáhnout změnou délky celého dipólu. Jedná se v podstatě o provozování dipólu mimo jeho rezonanční kmitočty. Změnou počtu ramen dochází ke změně poloměru impedanční kružnice a zároveň k přeladění. Přeladění lze pohodlně upravit pomocí délky celé dipólové struktury. Kombinací těchto dvou parametrů lze snadno nastavit obecnou komplexní hodnotu vstupní impedance.

### Technika ladění vstupní impedance pomocí budicího zářiče

Ladění vstupní impedance dipólem buzené vázané patchové antény umožňuje právě budicí dipól umístěný nad vlastní patchovou strukturou. Průměr impedanční smyčky lze měnit pomocí změny celkové délky dipólu. Dochází tak opět ke změně poloměru impedančních kružnic. Jemné doladění je pak možné provést prostřednictvím změny délky patchů. Kombinací těchto dvou parametrů lze nastavit reálnou hodnotu vstupní impedance (např.  $50\ \Omega$ )



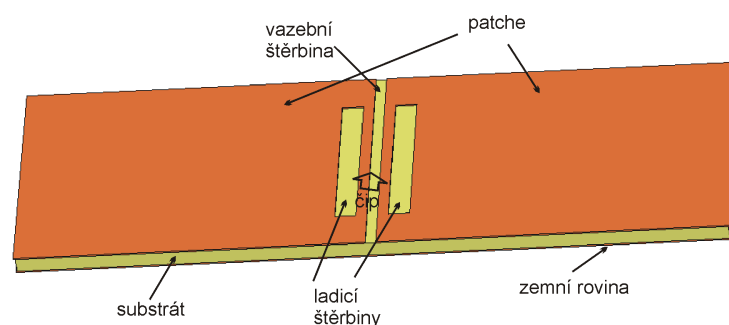
nebo komplexní hodnotu vstupní impedance v požadované oblasti induktivní části Smithova diagramu.

### Technika ladění vstupní impedance pomocí ladicích štěrbin

Odstraněním vrchního substrátu s budícím dipólem dojde ke značnému zjednodušení vázané patchové antény. Takováto struktura však do značné míry ztrácí možnost nastavovat vstupní impedanci. Impedanci antény lze částečně měnit změnou její šířky  $w$  či délky  $l$ . Tyto parametry však neumožňují změnu impedance v dostatečném rozsahu. Se změnou délky navíc dochází k významnému poklesu vyzařovací účinnosti a tyto úpravy tak dosažené vlastnosti antény silně degradují.

Pokud ve struktuře patchů v blízkosti napájené hrany vytvoříme dvojici ladicích štěrbin tvořících diskontinuitu; viz. obr. 3.10, lze pomocí změny jejich rozměrů (především šířky) a polohy ovlivňovat vstupní impedanci celé antény a dosáhnout tak požadovaných hodnot při zachování stávajících půdorysných rozměrů struktury.

V případě přímo buzené antény není hodnota vstupní impedance  $50\ \Omega$  dosažitelná a je třeba využít dipólem buzenou variantu. Komplexní hodnoty vstupní impedance požadované pro RFID aplikace je však možné pomocí ladicích štěrbin nastavit.



Obrázek 3.10: Přímou buzená anténa s ladicími štěrbinami.

## 3.3 Maximalizace čtecího dosahu UHF RFID systému

Tato kapitola se zabývá optimalizací celého RFID systému pracujícího v pásmu UHF s cílem dosáhnout maximální hodnoty čtecího dosahu. Kapitola by měla nastínit praktické využití antén navržených na základě zde uváděných nových technik dosažení extrémně nízkoprofilového zářiče s komplexní hodnotou vstupní impedance, který je schopný pracovat v blízkosti lidského těla při minimální změně vstupní impedance a zachování vyzařovací účinnosti lepší než cca 50%.

Maximalizace dosahu byla prováděna ve dvou základních typech prostředí. Prvním je volný prostor a druhým interiér budovy. Konkrétně byly použity chodby dvou šířek 4m a 2m.

Jako testovací byla použita dvojitou smyčkou buzená štěrbinová anténa z vázaných patchů. Jedná se o první vývojový krok využívající techniky vázaných patchů, ze kterého vychází obě následující varianty, u nichž bylo dosaženo značného zlepšení elektrických a především pak mechanických parametrů. Jednotlivé prototypy antén mají stejný charakter směrových diagramů a lze předpokládat, že nastavení parametrů systému pro maximalizaci čtecího dosahu bude shodné. S dalšími prototypy zářičů byly tedy udělány dílčí testy identifikačního dosahu, které jsou uvedeny v kapitole 4.

## 4 Výsledky

V této části jsou srovnány výsledky vzorků zářičů navržených na základě prezentovaných technik pro dosažení extrémně nízkého profilu antény a pro manipulaci s komplexní vstupní impedancí. Také jsou zde uvedeny výsledky testování těchto zářičů v rámci optimalizovaného RFID systému.

### 4.1 Dosažené parametry vzorků zářičů

V následujících tabulkách jsou uvedeny modelované a měřené parametry zářičů. Měření byla provedena ve volném prostoru a na agarovém fantomu lidského těla. Parametry fantomu v oblasti používaných kmitočtů ( $866\text{MHz}$  resp.  $869\text{MHz}$ ) jsou následující:  $\varepsilon_r \sim 55$ ,  $tg\delta \sim 0,5$ . Jeho rozměry jsou  $80 \times 110 \times 15\text{mm}$ . Účinnost antény byla měřena pomocí Wheelerovy metody. Velikost tzv. Wheelerova kloboučku je  $122 \times 122 \times 122\text{mm}$ . K měření bylo využito monopólového provedení antény. Zisk antény byl vypočten z měřené vyzařovací účinnosti a integrované vyzařovací charakteristiky.

	Přenosový koeficient [—]	Vyzařovací účinnost [%]	Anténní účinnost [%]	Zisk [dBi]
Simulace, volný prostor	0,9	69	62	3,2
Měření, volný prostor	0,56	86	49	2,7
Měření, agar	0,51	81	41	1,6

**Tabulka 4.1:** Parametry pětiramenné dipólové antény na pěnovém dielektriku na kmitočtu  $866\text{MHz}$ .

	Přenosový koeficient [—]	Vyzařovací účinnost [%]	Anténní účinnost [%]	Zisk [dBi]
Simulace, volný prostor	0,97	55	54	1
Měření, volný prostor	0,75	61	47	1,3
Měření, agar	0,78	82	64	1,7

**Tabulka 4.2:** Parametry dipólem buzené vázané patchové antény na kmitočtu  $869\text{MHz}$ .

	Přenosový koeficient [–]	Vyzařovací účinnost [%]	Anténní účinnost [%]	Zisk [dBi]
Simulace, volný prostor	0,93	60	56	1,1
Měření, volný prostor	0,93	55	52	1
Měření, agar	0,75	80	60	1,6

**Tabulka 4.3:** Parametry přímo buzené vázané patchové antény na kmitočtu 869 MHz.

Tabulka 4.4 porovnává mechanické vlastnosti navržených vzorků antén z hlediska využitelnosti pro identifikaci osob. Podstatným parametrem je zde především hmotnost antény. Z hlediska výrobní náročnosti a nákladů je pak výhodné jednovrstvé řešení a nízká relativní permitivita použitého substrátu.

Typ TAGu	Substrát	$\varepsilon_r$ [–]	Hmotnost [g]
Smyčkou buzená	dvouvrstvý	10	38
Dipólem buzená	dvouvrstvý	3,2	14
Přímo buzená	jednovrstvý	3,2	10
5-ti ramenný dipól	dvouvrstvý pěnový	1,3	9

**Tabulka 4.4:** Porovnání mechanických parametrů antén.

## 4.2 Maximalizace čtecího dosahu UHF RFID systému

Tato kapitola shrnuje výsledky dosažené při optimalizaci celého RFID systému pracujícího v pásmu UHF s cílem dosáhnout maximální hodnoty čtecího dosahu. Kapitola by měla nastínit praktické využití antén navržených na základě uváděných nových technik dosažení extrémně nízkoprofilového zářiče s komplexní hodnotou vstupní impedance, který je schopný pracovat v blízkosti lidského těla při minimální změně vstupní impedance a zachování vyzařovací účinnosti lepší než cca 50 %.

Maximalizace dosahu byla prováděna ve dvou základních typech prostředí. Prvním je volný prostor a druhým interiér budovy. Konkrétně byly použity chodby dvou šířek 4 m a 2 m.

Jako testovací byla použita dvojistou smyčkou buzená štěrbinová anténa z vázaných patchů. Jedná se o první vývojový krok využívající techniky vázaných patchů, ze kterého vychází obě následující varianty, u nichž bylo dosaženo značného zlepšení elektrických a především pak mechanických parametrů. Jednotlivé prototypy antén mají stejný charakter směrových diagramů a lze předpokládat, že nastavení parametrů systému pro maximalizaci čtecího dosahu bude shodné. S dalšími prototypy zářičů byly tedy udělány jen dílčí testy identifikačního dosahu.

Testovaná konfigurace	$p$ [m]	Čtecí dosah [m]			
		Predikce			Test
		čtečka-TAG sim.	čtečka-TAG měř.	TAG-čtečka sim.	
Otevřený prostor	0	8,0	7,2	7,2	9
	1	7,7	6,2	7,0	6,5
	2	7,6	4,0	5,0	4
	3	7,0	nespolehlivé	nespolehlivé	nespolehlivé
Chodba 4m	0	13,8	13,8	11,0	9
	1,8	13,0	15,8	8,2	8
Chodba 2m	0	16,4	16,4	15,8	16
	0,8	9,3	9,8	9,0	9

**Tabulka 4.5:** Čtecí dosah testovaných konfigurací

V tabulce 4.6 je uvedeno porovnání hodnot čtecího dosahu systému s jednotlivým typem TAGu. Jak je patrné z porovnání dipólem buzené a přímo buzené antény, identifikační dosah je v podstatě totožný, což odpovídá předpokladům. Jedná se totiž o stejný typ zářiče lišící se pouze způsobem buzení. Použitý přepočít tak lze považovat za správný. Pomocí smyčkou buzené antény bylo dosaženo větší identifikační vzdálenosti, což lze přičíst odlišné konstrukci antény využívající větší relativní tloušťky substrátu a čtveřice celovlnných vázaných patchů. Podobných vzdáleností bylo dosaženo s pětiramennou dipólovou anténou, která vykazuje větší zisk.

Typ antény	Chodba 4m		Chodba 2m	
	$p = 0m$	1,8m	0m	0,8m
Smyčkou buzená	10,6	9,2	18,7	10,6
Dipólem buzená	7,5	7	17	8,8
Přímo buzená	7	6	16,5	10
5-ti ramenný dipól	9,5	8	17,5	10,5

**Tabulka 4.6:** Čtecí dosah testovaných konfigurací při vysílacím výkonu 1W a citlivosti  $-14dBm$ .

## 5 Závěr

Dosažení extrémně nízkého profilu antény (typicky menšího než  $0,01 \lambda_0$ ), jejíž parametry jsou do jisté míry nezávislé na vlnenostech objektu v jehož blízkosti je anténa umístěna, je poměrně obtížná úloha a nebyla dosud uspokojivě vyřešena. Motivací vzniku této práce je přispět k řešení této problematiky. Práce podrobně analyzuje vlastnosti antén pracujících nad kovovými a dielektrickými objekty. Jedná se především o vyzařovací účinnost a vstupní impedanci. Rešerše je zaměřena na tzv. tištěné antény, které jsou vhodnou třídou pro dosažení nízkého profilu zářiče. Pro odstínění vlivu lidského těla či jiných objektů je využíváno stínící vodivé roviny, která může být nedílnou součástí daného typu antény (např. patch) nebo se jedná o přídavnou vodivou rovinu sloužící pouze pro odstínění (např. dipól nad stínící rovinou). Vlastní práce autora se zaměřuje na návrh a studium technik pro výrazné snížení profilu antén pro činnost v bezprostřední blízkosti lidského těla případně vodivých objektů. Jako nezbytná součást zmíněných technik bylo nutné vyřešit způsoby ladění vstupní impedance zářičů do požadovaného rozsahu komplexních hodnot. Za tímto účelem byl proveden rozsáhlý soubor parametrických studií.

K původnímu přínosu práce patří výrazné vylepšení techniky víceramenných dipólů v blízkosti vodivé roviny, jejíž cílem bylo současné snižování profilu zářiče, zvýšení vyzařovací účinnosti a naladění komplexní vstupní impedance v požadovaném rozsahu. Podstatné vylepšení spočívá ve vytvoření planární tištěné struktury, jejíž nedílnou součástí je stínící rovina. V případě techniky víceramenných dipólů lze měnit vstupní impedanci pomocí počtu nenapájených ramen a pomocí délky struktury.

Dále byla nalezena zcela nová technika umožňující výrazné snížení profilu antény (podařilo se dosáhnout výšky profilu  $0,0022 \lambda_0$ ) při zachování vyzařovací účinnosti lepší než 50 %. Tato technika byla nazvána technikou vázaných patchů a na jejím základě bylo vytvořeno několik variant vykazujících odlišné vlastnosti. V případě vázaných patchů byly navrženy dva přístupy pro ladění vstupní impedance. První je ladění vstupní impedance pomocí parametrů budícího dipólu. Druhou je ladění impedance pomocí tzv. ladicích šterbin vytvořených přímo ve struktuře zářiče. Tyto techniky jsou podrobně popsány v kapitole 3.2.

Na základě nalezených technik dosažení extrémně nízkého profilu zářiče a způsobů ladění vstupní impedance byly realizovány prototypy antén a měření ověřeny jejich vlastnosti. Byly potvrzeny uspokojivé parametry zářičů, které jsou prakticky využitelné v reálných systémech.

S využitím navržených zářičů byla provedena optimalizace komerčního RFID systému s cílem maximalizovat čtecí dosah a byly provedeny reálné testy celého systému, jejichž uspokojivé výsledky přináší možnost nasazení antén navržených a vyvinutých na základě popisovaných technik do praxe.

## 5.1 Shrnutí a původní přínos

Lze konstatovat, že se podařilo splnit cíle práce vytyčené v kapitole 2. Původní výsledky, které vnikly při přípravě této práce, je možné pro přehlednost shrnout do následujících bodů.

- Vylepšení techniky víceramenných dipólů umožňující snížit výšku profilu zářiče až na  $0,003 \lambda_0$  při zachování relativně vysoké hodnoty vyzařovací účinnosti (v závislosti na výšce substrátu lepší než 50 %) se současným naladěním komplexní vstupní impedance v rozsahu daném hodnotami používaných RFID čipů.
- Nová technika vázaných patchů umožňující dosažení extrémně nízkého profilu zářiče ( $0,0022 \lambda_0$ ) pracujícího nad lidským tělem při zachování relativně vysoké hodnoty vyzařovací účinnosti (v závislosti na výšce substrátu lepší než 50 %).
- Nové přístupy k ladění vstupní impedance vázaných patchů pro dosažení komplexních hodnot pomocí budícího dipólu nebo ladicích štěrbin vytvořených v motivu zářiče.
- Optimalizace parametrů UHF RFID systému pro identifikaci pohybujících se osob ve volném prostoru a v interiéru budov s cílem maximalizovat čtecí dosah.

# Literatura

- [1] G. Marrocco, "Rfid antennas for the uhf remote monitoring of human subjects," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 6, 2007.
- [2] D. C. Ranasinghe, D. M. Hall, P. H. Cole, and D. W. Engels, "An embedded uhf rfid label antenna for tagging metallic objects," in *Proceeding of Intelligent Sensors, sensor Networks and Information Processing Conference*, pp. 343?–347, 2004.
- [3] J. Siden, H. E. Nilsson, A. Koptug, and T. Olsson, "A distanced rfid dipole for a metallic supply chain label," in *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2006*, pp. 3229–3232, 2006.
- [4] G. A. Conway and W. G. Scanlon, "Low-profile patch antennas for over-body-surface communication at 2.45 ghz," in *IWAT 2007*, pp. 416–419, 2007.
- [5] L. Ukkonen, D. Engels, L. Sydanheimo, and M. Kivikoski, "Planar wire-type inverted-rfid tag antenna mountable on metallic objects," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004*, 2004.
- [6] M. Hirvonen, P. Pursula, K. Jaakkola, and K. Laukkanen, "Planar inverted-f antenna for radio frequency identification," *Electronics Letters*, vol. 40, pp. 848–850, 2004.
- [7] L. Ukkonen, L. Sydanheimo, and M. Kivikoski, "Effects of metallic plate size on the performance of microstrip patch-type tag antennas for passive rfid," *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 4, pp. 410–413, 2005.
- [8] D. F. Sievenpiper, "High-impedance electromagnetic surfaces," *The disertation work, University of California, Los Angeles*, 1999.
- [9] F. Sievenpiper, D., L. Zhang, and et all, "High-impedance electro-magnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 11, 1999.
- [10] S. Clavio, R. E. Diaz, and W. E. McKinzie, "Design methodology for sievenpiper high-impedance surfaces: An artificial magnetic conductor for positive gain electrically small antennas," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 10, 2003.
- [11] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Reflection phase characterizations of the ebg ground plane for low profile wire antenna applications," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 10, 2003.



- [12] G. Fontgalland, P. Reffeira, T. Vuong, N. Raveu, and H. Baudrand, "Proposal of new ebg ground planes in the electric size reduction design of planar antennas," in *IEEE Proceedings of the Advanced Industrial Conference on Telecommunications*, 2005.
- [13] K. Inafune and E. Sano, "Multiband artificial magnetic conductors using stacked microstrip patch layer," in *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings*, 2005.
- [14] D. Kern, D. Werner, A. Monorchio, L. Lanuzza, and M. Wilhelm, "The design synthesis of multiband artificial magnetic conductors using high impedance frequency selective surfaces," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 1, 2005.
- [15] M. Bray and W. D. Bayraktar, Z. and, "Ga optimized ultra-thin tunable ebg amc surfaces," in *APS 2006*, pp. 410 – 413, 2006.
- [16] M. Bray and D. Werner, "A novel design approach for an independently tunable dual-band ebg amc surfaces," in *APS 2004*, vol. 1, pp. 289–292, 2004.
- [17] M. Bray and D. Werner, "A broadband open-sleeve dipole antenna mounted above a tunable ebg amc ground plane," in *APS 2004*, vol. 2, pp. 1147–1150, 2004.
- [18] S. Bashir, M. Hosseini, R. Edwards, M. Khattak, and L. Ma, "Bicep mounted low profile wearable antenna based on a nonuniform ebg ground plane ? flexible ebg inverted-l (febgil) antenna," in *IEEE Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 2008.
- [19] S. Best, "A novel element and feed configuration for a dipole very closely spaced to a pec ground plane," in *APS 2004*, vol. 3, pp. 2907–2910, 2004.
- [20] S. Best, "Improving the performance properties of a dipole element closely spaced to a pec ground plane," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2004.
- [21] R. C. Johnson and H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1984.
- [22] M. Polívka, M. Švanda, and H. P., *Development and Implementation of RFID Technology*, ch. UHF RFID of People, pp. 63–88. In-Tech, Viena, 2009.
- [23] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
- [24] M. Švanda and M. Polívka, "Horizontal five-arm folded dipole over metal screening plane for uhf rfid of dielectric objects," *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010.
- [25] M. Polívka, M. Švanda, and P. Černý, "The design of the multiple-arm folded dipole antenna operating closely spaced to a pec," *International Journal on Wireless & Optical Communications*, vol. 5, pp. 77–84, Sept. 2008.

- 
- [26] J. R. James and P. S. Hall, eds., *Handbook of Microstrip Antennas*. Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [27] M. Mazánek and P. Pechač, *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [28] M. Polívka, *Kompaktní uspořádání patch antén*. disertační práce, ČVUT, 2003.

# Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

## Časopisy s IF:

- [I] Švanda M., Polívka M.: Horizontal Five-Arm Folded Dipole over Metal Screening Plane for UHF RFID of Dielectric Objects, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, October 2010, vol. 52, issue 10, p. 2291-2294, ISSN 0895-2477
- [II] Švanda M., Polívka M.: Two Novel Extremely Low-Profile Slot-Couplet Two-Element Patch Antennas For UHF RFID of People, *Microwave and Optical Technology Letters*, February 2010, vol. 52, issue 2, p. 249-252, ISSN 0895-2477
- [III] Polívka M., Švanda M., Hudec P., Zvánovec S.: UHF RF Identification of Persons in Buildings and Open Areas, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, SI on Hardware and Integration Challenges of RFID's, vol. 57, issue 5, part 2, p. 1341-1347, May 2009, ISSN 0018-9480
- [IV] Švanda M., Polívka M.: Novel Dual-loop Antenna Placed over Patch Array Surface for UHF RFID of Dielectric and Metallic Objects, *Microwave and Optical Technology Letters*, March 2009, vol. 51, no. 3, p. 709-713, ISSN 0895-2477

## Časopisy recenzované:

- [V] Polívka M., Švanda M., Černý P.: The Design of the Multiple-Arm Folded Dipole Antenna Operating Closely Spaced to a PEC, *International Journal on Wireless & Optical Communications*, Special Issue, September 2008, vol. 5, no. 1, pp. 77 - 84, ISSN 0219-7995
- [VI] Švanda M., Polívka M., Hudec P.: Application of an UHF RFID System for Identification of Sportsmen in Mass Races, *Spec. Issue of Journal of the European Microwave Association*, vol. 3, Issue 4, pp. 294 - 301, 2007, ISBN 88-8492-324-7

## Kapitola v cizojazyčné knize:

- [VII] Polívka M., Švanda M., Hudec P.: UHF RFID of People, Chapter in Book: Development and Implementation of RFID Technology, In-Tech, Viena, Jan. 2009, ISBN 978-3-902613-54-7

## Patenty a užité vzory:

- [VIII] Švanda M., Polívka M.: Nízko profilová šterbinová anténa, Užité vzor ČR, Úřad průmyslového vlastnictví, 19707. datum zápisu užitého vzoru: 8.6.2009
- [IX] Švanda, M., Polívka, M.: Nízko profilová anténa. Užité vzor ČR, Úřad průmyslového vlastnictví, 19482. 30.3.2009
- [X] Hudec, P., Švanda, M., Polívka, M.: Komunikační anténa určená pro připevnění na tělo. Užité vzor ČR, Úřad průmyslového vlastnictví, 19152. 8.12.2008
- [XI] Švanda M., Polívka M.: Nízko profilová anténa, Užité vzor ČR, Úřad průmyslového vlastnictví, 18825. datum zápisu užitého vzoru: 18.8.2008

## Mezinárodní konference:

- [XII] Hudec P., Švanda M., Polívka M.: Active UHF Antennas for Demanding RFID Applications. In *Conference Proceedings - European Microwave Week 2010 (40th EuMC, EuRAD, EuMIC, EuWT)* [CD-ROM], 2010
- [XIII] Švanda M., Polívka M.: Extremely Low Profile UHF RFID TAG Antennas for Identification of People, In *EuCAP 2010 - 4rd European Conference on Antennas and Propagation* [CD-ROM]. Barcelona, Spain, 2010
- [XIV] Hudec P., Raboch J., Randus M., Hoffmann K., Holub A., Svanda M. and Polivka M.: Microwave Radar Sensors for Active Defense Systems. In *Conference Proceedings - European Microwave Week 2009 (39th EuMC, EuRAD, EuMIC, EuWT)* [CD-ROM], 2009
- [XV] Švanda M., Polívka M., Zvánovec S.: UHF RF Identification Distance in Indoor Areas, In *EuCAP 2009 - 3rd European Conference on Antennas and Propagation* [CD-ROM]. Berlin: VDE Verlag, 2009, p. 2318-2320. ISBN 978-3-8007-3152-7
- [XVI] Švanda M., Polívka M.: Parametric Study of the Novel UHF RFID Dual-loop Antenna, International Symposium on Antennas and Propagation, In *ISAP 2008 Proceedings* [CD-ROM]. Tokyo: IEICE, Institute of Electronics, Information and Communication Engineers , 2008, ISBN 978-986-84787-0-1.
- [XVII] Polívka M., Syrový M., Vrba D., Holub A., Švanda M.: Novel Metamaterial Cell-Based Resonator Antenna with Broadside Radiation Pattern, International Symposium on Antennas and Propagation, Taipei, In *ISAP 2008 Proceedings* [CD-ROM]. Tokyo: IEICE, Institute of Electronics, Information and Communication Engineers , 2008, ISBN 978-986-84787-0-1
- [XVIII] Vrba D., Polívka M., Hamouz P., Švanda M., Hudec P.: Efficiency Treatment of Composite Right/Left-Handed TL Zeroth-Order Resonator Antenna, In *European Microwave Week 2008 "Bridging Gaps" Conference Proceedings* [CD-ROM]. London: Horizon House Publications, 2008, p. 535-538. ISBN 978-2-87487-005-7.

- [XIX] Hudec P., Hoffmann K., Randus M., Ryneš M., Raboch J., Švanda M., Polívka M.: Microwave Radar Sensor for Detection of Anti-Armour Missiles, In *European Microwave Week 2008 "Bridging Gaps" Conference Proceedings* [CD-ROM]. London: Horizon House Publications, 2008, p. 116-119. ISBN 978-2-87487-005-7.
- [XX] Polívka, M., Švanda, M., Černý, P.: Multiple-Arm Folded Monopole Antenna Operating Extremely Close to a Conductive Plane. In *Proceedings of the 14th Conference on Microwave Techniques COMITE 2008* [CD-ROM]. Praha: Československá sekce IEEE, 2008, p. 61-66. ISBN 978-1-4244-2138-1.
- [XXI] Švanda, M., Polívka, M.: Dualband Wearable UHF RFID Antenna. In *Proceeding of the 2nd European Conference on Antennas and Propagation* [CD-ROM]. Stevenage, Herts: The Institution of Engineering and Technology (IET), 2007, ISBN 978-0-86341-842-6.
- [XXII] Polívka, M., Švanda, M., Hudec, P.: The Optimization of the RFID System for the Identification of Sportsmen in Mass Races. In *Conference Proceedings - European Microwave Week 2007 (37th EuMC, EuRAD, EuMIC, EuWT)* [CD-ROM]. London: Horizon House Publications, 2007, s. 732-735. ISBN 978-2-87487-000-2.
- [XXIII] Polívka, M., Švanda, M., Hudec, P.: Analysis and Measurement of the RFID System Adapted for Identification of Moving Objects. In *Proceedings of the 36th European Microwave Conference* [CD-ROM]. Piscataway: IEEE, 2006, ISBN 2-9600551-6-0.

#### **V recenzním řízení:**

- [XXIV] Švanda M., Polívka M.: Nízkoprofilová anténa, Patent ČR, probíhá úplný průzkum
- [XXV] Švanda M., Polívka M.: Nízkoprofilová anténa, Patent ČR, probíhá úplný průzkum
- [XXVI] Švanda M., Polívka M.: Nízkoprofilová šterbinová anténa, Patent ČR, probíhá úplný průzkum
- [XXVII] Hudec P., Švanda M., Polívka M.: Komunikační anténa určená pro připevnění na tělo, Patent ČR, probíhá úplný průzkum

pozn. Spoluautorský podíl všech publikací je rovný.



# Ohlasy

Autorovi jsou dosud známy následující ohlasy na publikace vztahující se k jádru disertační práce.

- [I] Mo L. and Qin Ch.: Planar UHF RFID Tag Antenna With Open Stub Feed for Metallic Objects, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 58, No.9, 2010

*citované články:*

Švanda M., Polívka M., “Novel Dual-loop Antenna Placed over Patch Array Surface for UHF RFID of Dielectric and Metallic Objects,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 51, pp. 709–713, 2009.

Polívka M., Švanda M. and Černý P., “Multiple-Arm Folded Monopole Antenna Operating Extremely Close to a Conductive Plane,” in *Proc. 14th Conf. on Microw. Techniques COMITE*, 2008, pp. 1–5.

- [II] Genovesi S., Monorchio A.: Low-Profile Three-Arm Folded Dipole Antenna for UHF Band RFID Tags Mountable on Metallic Objects, *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, 2010

*citovaný článek:*

Švanda M., Polívka M.: Horizontal Five-Arm Folded Dipole over Metal Screening Plane for UHF RFID of Dielectric Objects, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, October 2010, vol. 52, issue 10, p. 2291-2294, ISSN 0895-2477

- [III] Donelli, M., Franceschini, D: Experiments With a Modulated Scattering System for Through-Wall Identification, *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, 2010

*citovaný článek:*

Polívka M., Švanda M., Hudec P., Zvánovec S.: UHF RF Identification of Persons in Buildings and Open Areas, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, SI on Hardware and Integration Challenges of RFID's*, vol. 57, issue 5, part 2, p. 1341-1347, May 2009, ISSN 0018-9480

- [IV] Kellomaki T., Ukkonen L.: Design Approaches for Bodyworn RFID TAGs, 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, ISABEL 2010, Rome, 2010

*citované články:*

Polívka M., Švanda M., Hudec P., Zvánovec S.: UHF RF Identification of Persons in Buildings and Open Areas, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, SI on Hardware and Integration Challenges of RFID's*, vol. 57, issue 5, part 2, p. 1341-1347, May 2009, ISSN 0018-9480

Švanda M., Polívka M.: Two Novel Extremely Low-Profile Slot-Couplet Two-Element Patch Antennas For UHF RFID of People, *Microwave and Optical Technology Letters*, February 2010, vol. 52, issue 2, p. 249-252, ISSN 0895-2477

Švanda M., Polívka M.: Novel Dual-loop Antenna Placed over Patch Array Surface for UHF RFID of Dielectric and Metallic Objects, *Microwave and Optical Technology Letters*, March 2009, vol. 51, no. 3, p. 709-713, ISSN 0895-2477

Švanda M., Polívka M.: Extremely Low Profile UHF RFID TAG Antennas for Identification of People, In *EuCAP 2010 - 4rd European Conference on Antennas and Propagation* [CD-ROM]. Barcelona, Spain, 2010



# Resumé

Práce se zabývá problematikou antén pracujících v těsné blízkosti lidského těla při zachování dobré vyzařovací účinnosti (typicky lepší než 50 %). Je zde podrobně rozebrán vliv dielektrických a kovových objektů na vyzařovací účinnost a vstupní impedanci planárních typů antén. Na základě těchto rozborů bylo navrženo několik technik umožňujících dosáhnout extrémně nízkého profilu zářičů, jejichž parametry jsou minimálně ovlivňovány materiálem objektu, na jehož povrchu je zářič umístěn. Jedná se o techniku víceramenných dipólů a techniku vázaných patchů. Technikou vázaných patchů se podařilo dosáhnout výšky profilu  $0,0022 \lambda_0$  při zachování vyzařovací účinnosti lepší než 55 %.

Pro příslušné typy struktur byly vytvořeny techniky umožňující ladění vstupní impedance antén v komplexních hodnotách. Z hlediska ladění vstupní impedance byly pro techniku vázaných patchů nalezeny dva způsoby buzení. V prvním případě je využíván budicí dipól, v druhém přímé buzení, které vyžaduje doplnění struktury o tzv. ladicí šterbiny umožňující změnu vstupní impedance.

S využitím navržených zářičů byla provedena optimalizace komerčního RFID systému s cílem maximalizovat čtecí dosah a byly provedeny reálné testy celého systému, jejichž uspokojivé výsledky přinášejí možnost nasazení antén navržených a vyvinutých na základě popisovaných technik do praxe.

**klíčová slova:** bezkontaktní identifikace, nízkoprofilové antény, rádiová identifikace, RFID, tištěné antény, vyzařovací účinnost

# Summary

This doctoral thesis deals with antennas in the close proximity of the human body with good radiation efficiency (typically better than 50 %). The influences of the dielectric and metallic objects to the radiation efficiency and input impedance of the planar antennas is analyzed. Two novel techniques multiple arm technique and coupling patches technique for design of extremely low-profile antennas with good immunity against the influence of close dielectric and metallic objects are proposed. Extremely low antenna profile  $0.0022 \lambda_0$  and radiation efficiency better than 55 % was achieved by means of the coupling patches technique.

Techniques for input impedance tuning in complex values were developed for the above mentioned structures. Two feeding methods of coupling patches were proposed. The first one is the excitation dipole feeding and the second one is the direct feeding of the structure with tuning slots for input impedance tuning.

Optimization of the RFID system with the aim to maximize identification range is important part of the doctoral thesis.

**key words:** contactless identification, low-profile antennas, printed antennas, radiation efficiency, radiofrequency identification, RFID